

刘志伟,丁波涛,梁崇旭. 含水率对花岗岩边坡风化层界面剪切特性的影响[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 115-120. [LIU Zhiwei, DING Botao, LIANG Chongxu. Effect of Water Content on Weathered Layer Interface Shear Characteristics of Granite Slope [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 115-120]

含水率对花岗岩边坡风化层界面剪切特性的影响

刘志伟¹, 丁波涛¹, 梁崇旭²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 511300;

2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 为了研究含水率变化对成层状风化花岗岩边坡稳定性的影响, 进行了一系列单调直剪试验。设置四种含水率(13%、17%、21%和25%)和三种干密度(ρ_{d1} 、 ρ_{d2} 、 ρ_{d3}), 分析不同干密度下含水率对花岗岩残积土-全风化花岗岩界面剪切特性的影响。试验结果表明: 在低含水率、高干密度和低竖向应力下, 界面剪应力易发生剪切软化, 反之, 更易发生剪切硬化; 含水率越高, 最大剪胀量越小, 且干密度越大, 最大剪胀量受含水率变化的影响越小; 含水率升高会大幅降低界面抗剪强度, 且干密度越大、竖向应力越小, 界面抗剪强度随含水率的变化率越大。

关键词: 风化花岗岩; 风化层界面; 含水率; 剪切特性

中图分类号: U418.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0115-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.16

Effect of Water Content on Weathered Layer Interface Shear Characteristics of Granite Slope

LIU Zhiwei¹, DING Botao¹, LIANG Chongxu²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511300, China ; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to study the effect of rainfall on the stability of weathered granite layered slope, a series of monotone direct shear tests were carried out. Four kinds of water content (13%, 17%, 21% and 25%) and three kinds of dry density were set to analyze the effect of water content on the shear characteristics of granite residual soil and completely weathered granite interface shear behaviour. The experimental results indicate that the shear stress of the interface is prone to shear softening under low water content, high dry density and low normal stress, and otherwise, shear hardening is more likely to occur. The maximum dilatancy decreases as the increase of water content. And the larger the dry density is, the less the effect of water content on the maximum dilatancy is. The increase of water content significantly reduces the interfacial shear strength, and the greater the dry density, the smaller the normal stress, and the greater the attenuation coefficient of interfacial shear strength.

Keywords: Weathered granite; Weathered layer interface; Water content; Shear properties

收稿日期: 2021-10-10

基金项目: 交通荷载作用下格栅加筋三明治形混合填料挡土墙的变形机理研究(51678352)

作者简介: 刘志伟(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事工程地质、环境与岩土工程。

E-mail: liuzhiwei@gedi.com.cn

0 引言

在我国沿海地区，花岗岩边坡上覆较厚的风化层，且根据其风化程度又可分成不同的沉积层^[1-2]（图1），各层土体渗透性不同，在降雨过程中常在残、坡积土层底部产生滞水，导致界面强度软化，在风化层为顺倾向产状时，极易出现残积土沿着下伏全风化花岗岩接触面的滑动破坏^[3]。Kim等^[4]人也发现雨季花岗岩区边坡多发生上部残积土、崩积土沿基岩界面的浅层滑坡。

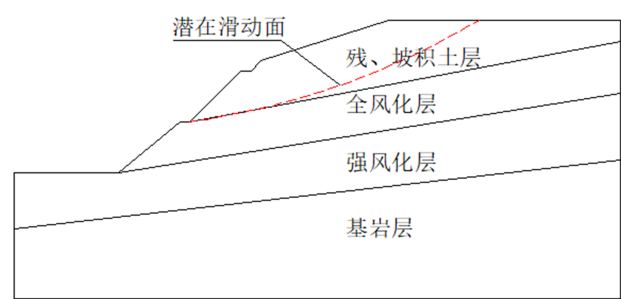


图1 风化花岗岩边坡示意图
Fig.1 Schematic diagram of weathered granite slope

边坡中的土岩界面、风化面、不同性质土层接触面等均属于土体宏观结构面^[5]。目前国内外学者针对土体宏观结构面进行了广泛的研究，Luo等^[6]探究了黄土节理在不同含水率下的剪切特性，发现节理内摩擦角在不同干密度下均随含水率的升高先增加后减小。李鹏等^[7]研究了含水率对碎石土、堆积体-基岩接触面剪切特性的影响。Zhang等^[8]和杨忠平等^[9]分别研究了粗糙度对砂土-粘土界面和土石混合料-基岩接触面剪切特性的影响。

以上围绕土体宏观结构面的研究较少涉及风化花岗岩，对风化花岗岩的研究大多针对单一风化层。许旭堂等^[10]对闽南地区三类花岗岩残积土含水率和干密度与抗剪强度参数指标进行相关分析，并建立经验公式。Borana等^[11]研究了土体基质吸力对风化花岗岩-钢结构接触面剪切特性的影响。

综上所述，在降雨作用下，花岗岩残积土-全风化花岗岩界面强度对边坡的稳定性影响较大。目前的研究大多针对单一风化层，缺乏对不同风化层界面剪切特性的研究。因此，本研究考虑干密度的影响，通过一系列直剪试验分析花岗岩残积土和全风化花岗岩界面在不同含水率下的剪切特性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自广州市某工地边坡的坡脚区段。根据实测标准贯入击数 N ，发现软弱面以上为残积土层($N<30$)，软弱面以下为全风化层($30<N<50$)，即软弱面在残积土层和全风化层界面附近。试验土样物理参数如表1所示。

表1 土样物理参数
Table 1 Physical parameters of soil samples

土样	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重	塑限/ (%)	液限/ (%)	塑性 指数/(%)
残积土	1.48	2.75	24.91	46.80	21.89
全风化岩	1.58	2.66	22.62	40.31	17.69

1.2 试验仪器及制样方法

直剪试验采用气动直剪仪，剪切盒直径为50 mm、高度为20 mm。将两种土体风干、碾碎、过筛，加水充分搅拌，放置密封袋中静置48 h，使水分混合均匀。在制备双层土试样时，首先在定制的制样器中放置垫块，称量全风化层土体，放入制样器中压样；然后取出垫块，称量残积土，放于制样器中全风化层土体之上，压样静置5 min；最后，使用脱模器将压制好的试样取出并放入剪切盒中进行直剪试验。

1.3 试验方案

表2为具体的试验方案。实际边坡呈现“上疏下密”的特点，故在制样时，控制残积土干密度小于全风化层土体。以边坡实际干密度 ρ_{d0} 为依据，分别乘以0.9、1.0和1.1，得到三种干密度，依次记为 ρ_{d1} 、 ρ_{d2} 、 ρ_{d3} 。残积土干密度依次为1.33 g/cm³、1.48 g/cm³、1.63 g/cm³；全风化层土体对应干密度依次为1.42 g/cm³、1.58 g/cm³、1.74 g/cm³。剪切速率为1.0 mm/min。

表2 试验方案
Table 2 Test scheme

类型	含水率/ (%)	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	竖向应力/kPa
界面	9、13、 17、21、25	ρ_{d1} 、 ρ_{d2} 、 ρ_{d3}	50/100/150 200

2 试验结果

2.1 剪切应力—位移特征分析

由图2可得,随着含水率的升高,界面剪切硬化趋势更明显(图2(a)),由剪切软化逐渐变为剪切硬化(图2(b)~图2(e))。同时,当剪应力出现软化时,含水率越高,剪切破坏位移越大。

干密度和竖向应力也会影响不同含水率下剪切应力—位移曲线。由图2(a)、图2(b)和图2(c)可得,在低干密度下,不同含水率的界面剪应力均呈现剪切硬化;而随着干密度的增大,低含水率(如9%、13%和17%)界面逐渐由剪切硬化变为剪切软化,且干密度越大,软化型曲线峰后强度下降越多,脆性破坏越明显,这与Wei等^[12]人结论一致。由图2(b)、图2(d)和图2(e)可得,竖向应力越大,不同含水率下曲线更易呈现剪切硬化型。

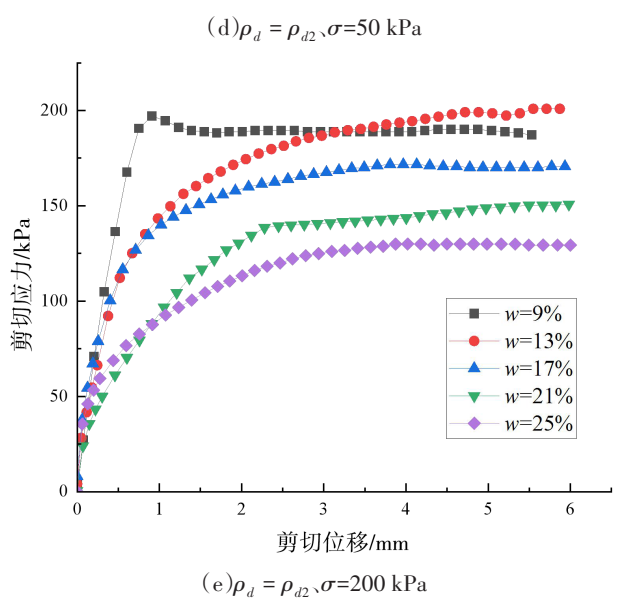
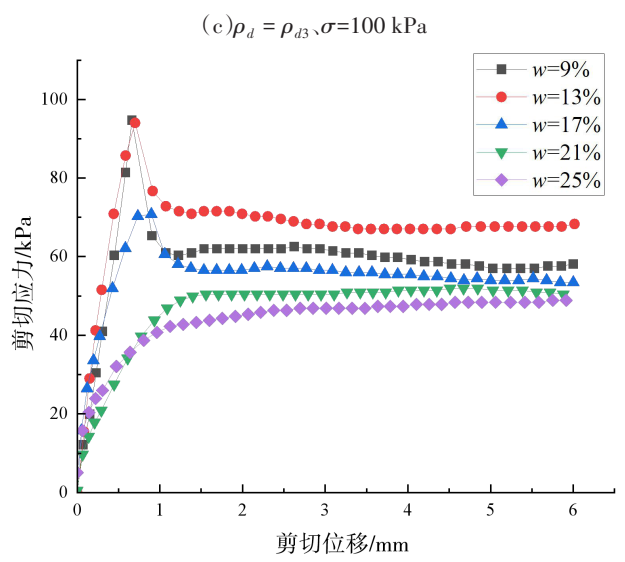
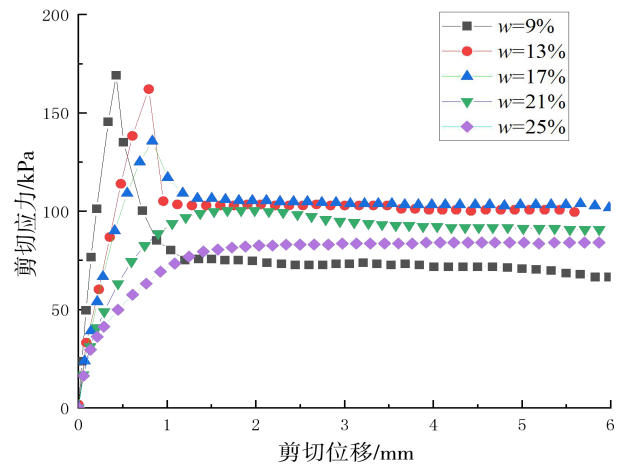
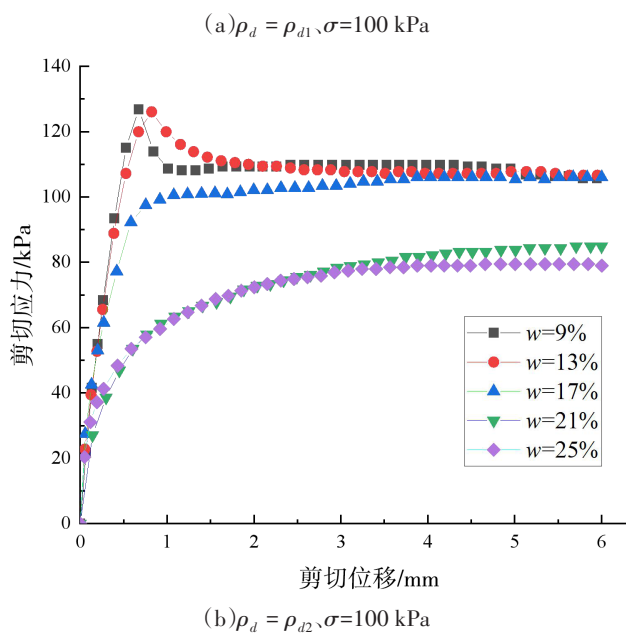
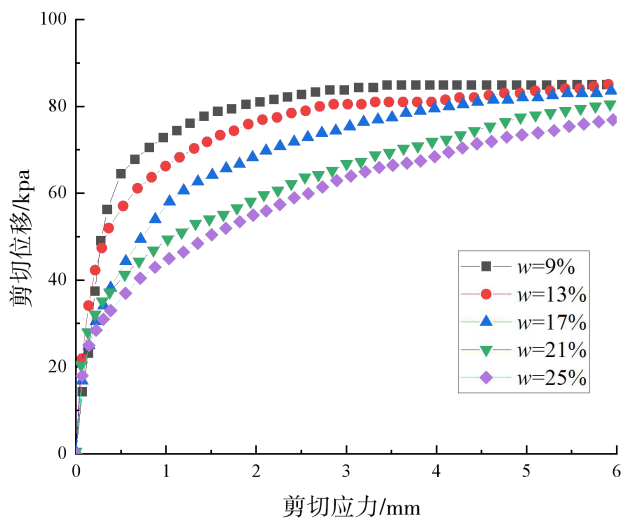


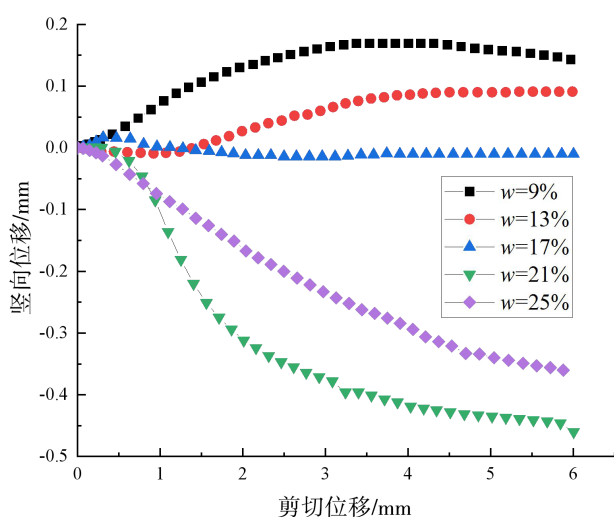
图2 界面剪切应力—位移特征曲线
Fig. 2 Shearing stress-displacement characteristic curve of interface

2.2 竖向位移—剪切位移特征分析

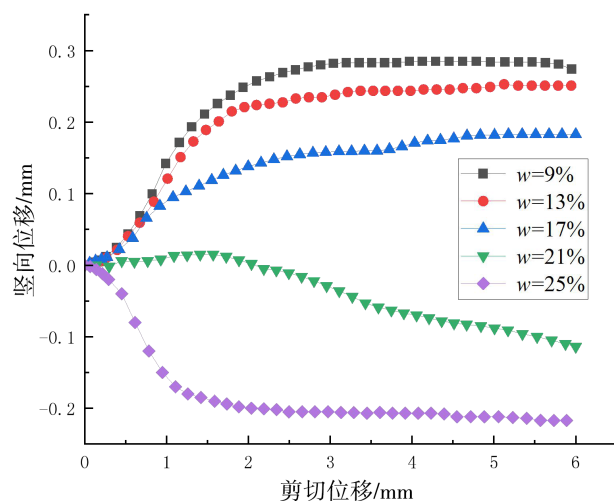
图3反应了风化层界面剪切过程中的竖向位移

与剪切位移的关系。规定剪胀为正。在剪切过程中,低含水率易出现剪胀,高含水率易出现剪缩(如图3(a)、图3(b)和图3(d))。但含水率对土体剪胀性的影响规律同时受干密度和竖向应力影响,在高干密度下,所有含水率的土体均呈现剪胀性(图3(c)),而在高竖向应力下,均呈现剪缩现象(图3(e))。

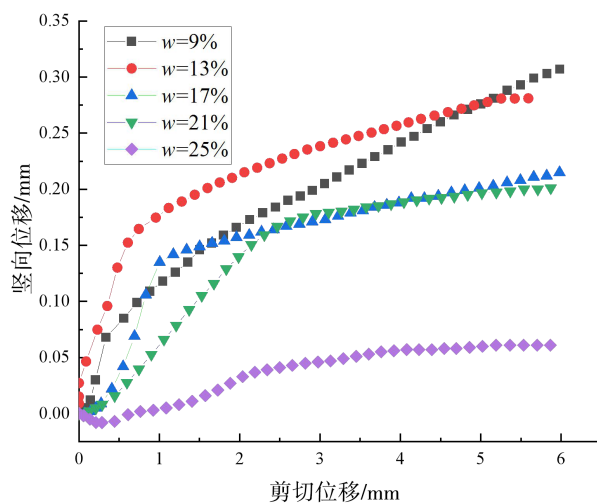
此外,在高干密度下,竖向位移-剪切位移曲线出现明显的转折点(3(c)),即当到达一定剪切位移后竖向位移增长速率放缓,出现明显转折点。对比图3(c)和图2(c),发现当含水率为9%、13%和17%时,竖向位移-剪切位移曲线的转折点对应的剪切位移和剪切应力-位移关系曲线对应的破坏位移接近。这主要与破坏模式有关,在高干密度下,剪断面更平整,破坏趋向于“脆断”^[12],所以当剪切位移达到破坏位移时会出现明显的转折点。



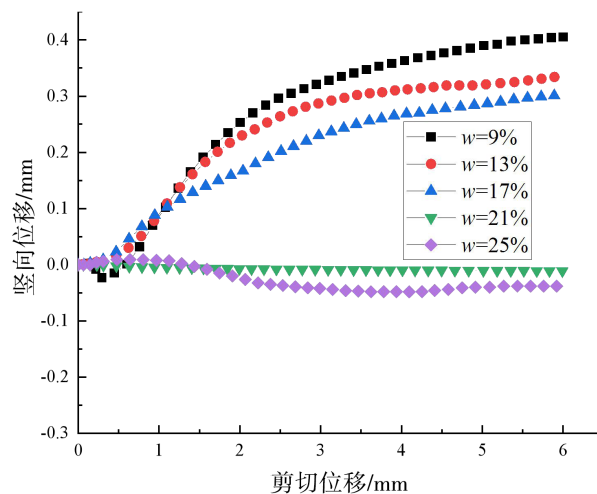
(a) $\rho_d = \rho_{d1}, \sigma = 100 \text{ kPa}$



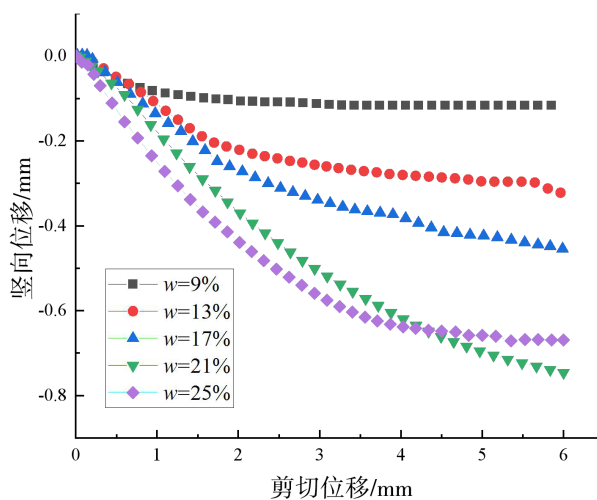
(b) $\rho_d = \rho_{d2}, \sigma = 100 \text{ kPa}$



(c) $\rho_d = \rho_{d3}, \sigma = 100 \text{ kPa}$



(d) $\rho_d = \rho_{d1}, \sigma = 50 \text{ kPa}$



(e) $\rho_d = \rho_{d1}, \sigma = 200 \text{ kPa}$

图3 界面竖向位移-剪切位移关系

Fig.3 Vertical displacement-shearing displacement curve of interface

图4所示为不同竖向应力和干密度下土体最大剪胀量随含水率变化的关系图。随着含水率的升

高,最大剪胀量整体上减小,逐渐从剪胀变为剪缩。但在部分情况下其最大剪胀量并非一直减小,而是存在一个界限含水率,使得最大剪胀量为极小值。此外,竖向应力越小、干密度越大,土体最大剪胀量越大。而在不同干密度下,土体最大剪胀量随含水率的变化幅度不同。具体地,含水率从9%到25%,三种干密度 (ρ_{d1} 、 ρ_{d2} 、 ρ_{d3}) 下最大剪胀量分别减小了0.529 mm、0.502 mm和0.247 mm。可见干密度越大,含水率对土体最大剪胀量的影响越小。

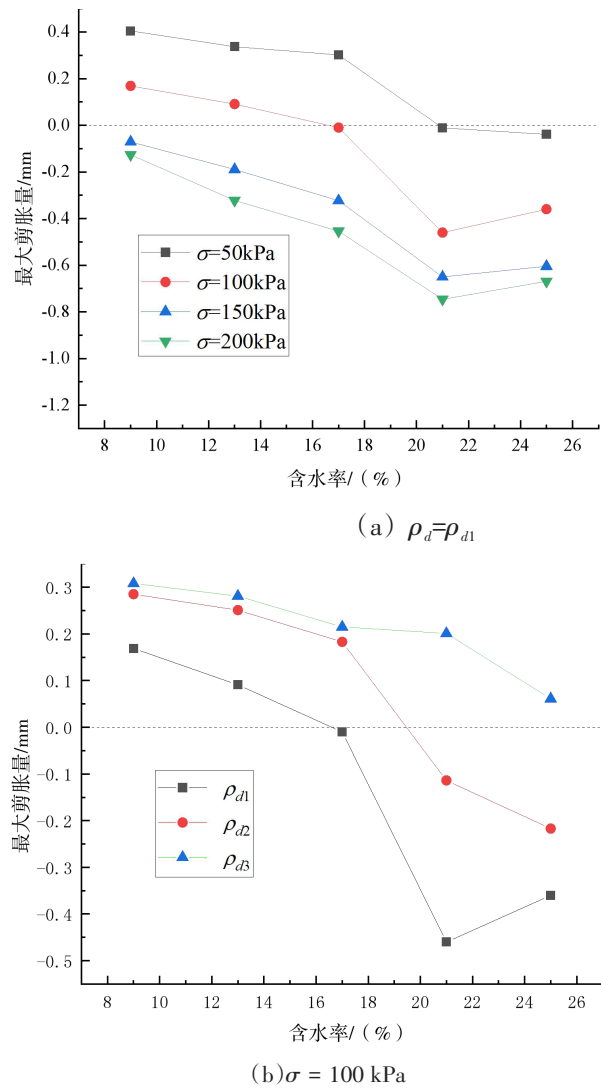


图4 界面最大剪胀量与含水率、竖向应力和干密度的关系
Fig.4 Relationship between the maximum dilatancy of interface and water content, vertical stress and dry density

2.3 抗剪强度

图5反应了界面抗剪强度与含水率、竖向应力以及干密度的关系,其中,图5(a)干密度 $\rho_d = \rho_{d2}$,图5(b)竖向应力 $\sigma = 100 \text{ kPa}$ 。可见界面抗剪强度随含水率升高而大幅减小,而提高竖向应力和干密度可有效增加其强度。同时还可以看出,当含水率

从9%到13%、从21%到25%时,不同竖向应力和干密度下对应的界面抗剪强度降幅均较小,而从13%到21%时界面抗剪强度降幅均较大。可见,当边坡土体含水率较低(低于13%)或者较高(高于21%)时,风化层界面抗剪强度受含水率变化的影响均较小。

不难看出,不同竖向应力和干密度下含水率对界面抗剪强度的影响存在明显差异。为此,定义界面强度随含水率的变化率 α :

$$\alpha = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1} \quad (1)$$

式中: τ_1 是 $w=9\%$ 时的抗剪强度, τ_2 是 $w=25\%$ 时的抗剪强度。

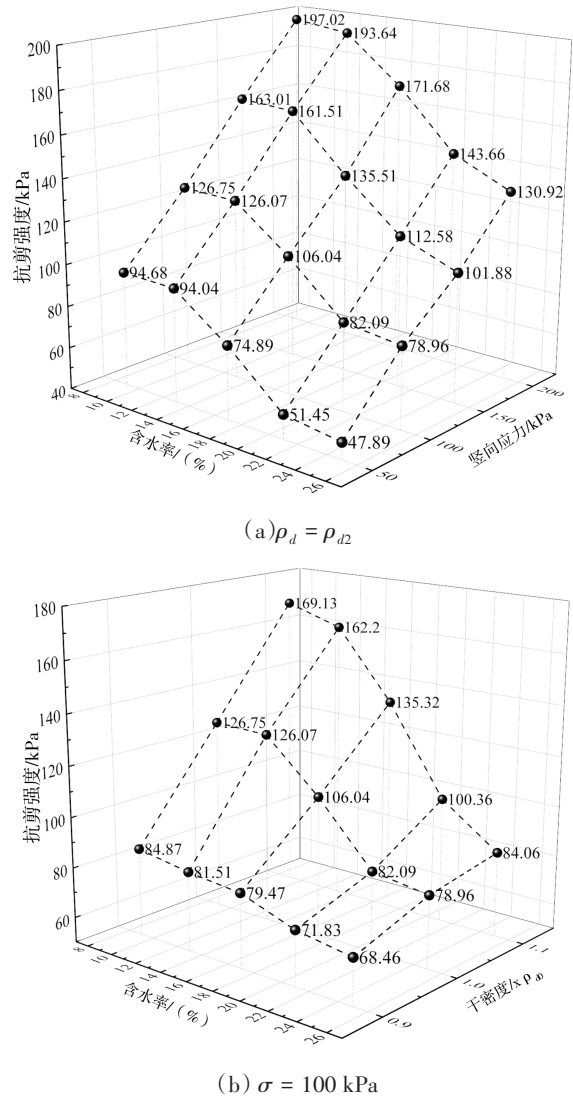


图5 界面抗剪强度与含水率、竖向应力和干密度的关系
Fig.5 Relationship between interfacial shear strength and water content, vertical stress and dry density

表3列出了界面抗剪强度在不同竖向应力和干密度下的变化率。可以看出,变化率 α 随竖向应力

的增大而减小；同时，干密度越大，界面抗剪强度变化率越大，反应了界面抗剪强度遇水软化效应越明显。而且，干密度对界面抗剪强度的增强作用随含水率的升高被逐渐弱化(图5)。

表 3 界面抗剪强度随含水率的变化率
Table 3 Change rate of interfacial shear strength with water content

界 面	竖向应力/ kPa				干密度		
	50	100	150	200	ρ_{d1}	ρ_{d2}	ρ_{d3}
α	0.494	0.377	0.375	0.335	0.193	0.377	0.503

3 结论

(1)风化层界面剪切应力-位移关系呈现剪硬化和剪切软化两种特征，剪应力在低含水率、高干密度和低竖向应力下更易出现剪切软化；反之，更易出现剪硬化。

(2)含水率越低、竖向应力越小、干密度越大，界面最大剪胀量越大，易发生剪胀，反之更易发生剪缩；提高干密度可有效抑制含水率升高对土体最大剪胀量的影响。

(3)当含水率从9%升至25%时，风化层界面抗剪强度大幅减小，且竖向应力越小、干密度越大，界面抗剪强度随含水率变化越明显。

参考文献

[1] Wei Y, Wu X, Xia J, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China [J]. Soil and Tillage Research, 2019(187)50–59.
[2] 中华人民共和国行业标准编写组. 岩土工程勘察规范: GB 50021–2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[3] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 872–880+886.
[4] Kim K S, Kim M I, Lee M S, et al. Regression equations for estimating landslide-triggering factors using soil characteristics[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3560.
[5] 蒋建平, 章杨松, 罗国煜. 土体宏观结构面及其对土体破坏的影响[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 482–485.
[6] Luo Y, Wang T H, Liu X J, et al. Laboratory study on shear strength of loess joint[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2014, 39(11): 7549–7555.
[7] 李鹏, 苏生瑞, 马驰, 等. 堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理—以祖师庙滑坡为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(5): 1471–1479.
[8] Zhang Z L, Cui Z D, Zhao L Z. Shear strength of sand-clay interfaces through large-scale direct shear tests[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(5): 4343–4357.
[9] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合体—基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1947–1954.
[10] 许旭堂, 简文彬, 柳侃. 含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(02): 364–369.
[11] Borana L, Yin J H, Singh D N, et al. Interface behavior from suction-controlled direct shear test on completely decomposed granitic soil and steel surfaces[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(6): D4016008.
[12] Wei J, Shi B, Li J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: a case study in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Catena, 2018(166)124–133.